

***В. А. Шабашов, В. В. Сагарадзе, В. П. Пилюгин, К. А. Козлов\*,  
А. Е. Заматовский, А. В. Литвинов, Н. В. Катаева***

Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

\*kozlov@imp.uran.ru

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЦЕССЫ ДИНАМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ В СПЛАВЕ Fe–36Ni–9Al**

Установлено, что при деформации сплава Fe–36Ni–9Al во вращающихся наковальнях Бриджмэна в интервале температур от криогенных до 573 К происходит смена направления фазовых переходов от атомного разупорядочения и растворения интерметаллидов к их дополнительному ускоренному выделению. Процессом, влияющим на кинетику «растворения – выделения» интерметаллидов в металлической матрице, является динамическое старение.

*Ключевые слова:* деформация, старение, Fe–Ni–Al, фазовые переходы.

***V. A. Shabashov, V. V. Sagaradze, V. P. Pilyugin, K. A. Kozlov,  
A. E. Zamatovskiy, A. V. Litvinov, N. V. Kataeva***

## **THE EFFECT OF TEMPERATURE AND STRAIN RATE THE DYNAMIC PROCESSES OF AGING IN THE ALLOY Fe–36Ni–9Al**

It was found that the deformation of the alloy Fe–36Ni–9Al in rotating anvils of Bridgman in the temperature range from cryogenic to 573 K there is a change of direction of phase transitions from the atomic disordering and dissolution of intermetallic compounds to their additional accelerated selection. Process affecting the kinetics of the “dissolution- precipitation” of intermetallics in the metal matrix is a dynamic aging.

*Keywords:* deformation, aging, Fe–Ni–Al, phase transformations.

Как показано в ряде работ [1–6], поведение структуры в процессе большой пластической деформации имеет сложный разнонаправленный характер и включает в себя насыщение структуры дефектами различной природы и релаксацию, в том числе с участием атомной диффузии. Релаксационная составляющая по диффузионному механизму существенно возрастает при длительной интенсивной деформации, например при равноканальном угловом прессовании или кручении образца под давлением в наковальнях Бриджмэна, и в значительной степени определяет

кинетику и направление структурных превращений, в частности кинетику механосплавления.

Однако до настоящего времени отсутствовали экспериментальные данные по совокупному влиянию на кинетику и механизм растворения интерметаллидов основных параметров (температуры и скорости деформации), определяющих релаксационную составляющую этого процесса. Большое влияние скорости деформации на процесс механосплавления связано с изменением времени непрерывного процесса генерации точечных дефектов, участвующих в атомном массопереносе.

Задача настоящего исследования состояла в анализе механизма и кинетики растворения интерметаллидных частиц  $\gamma'$ -фазы  $\text{Ni}_3\text{Al}$  в аустенитном сплаве  $\text{Fe-36Ni-9Al}$  и оценке влияния на него скорости и температуры деформации сдвигом под давлением во вращающихся наковальнях Бриджмэна.

Исследования проводили на стареющем аустенитном сплаве  $\text{Fe-36Ni-9Al}$  с ГЦК-решеткой. Для сравнения использовали нестареющий бинарный аустенитный сплав  $\text{Fe-35Ni}$ . Образцы сплавов подвергали воздействию сдвигом под давлением (СД) 8 ГПа во вращающихся наковальнях Бриджмэна при различных степенях деформации со скоростями  $\dot{\epsilon} = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  ( $\omega = 0,3 \text{ об/мин}$ ) и  $\dot{\epsilon} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  ( $\omega = 1 \text{ об/мин}$ ) при температурах 77, 293, 473 и 573 К.

Мессбауэровские спектры получали при комнатной температуре в геометрии на пропускание резонансного  $\gamma$ -излучения с энергией 14,4 кэВ от источника  $^{57}\text{Co(Rh)}$ . Атомное перераспределение в сплаве  $\text{Fe-36Ni-9Al}$  оценивали по изменению эффективной концентрации никеля в  $\gamma$ -матрице с использованием зависимости среднего внутреннего поля  $\langle H \rangle$  на ядре  $^{57}\text{Fe}$  от содержания никеля. Структуру сплава анализировали на электронном микроскопе *JEM-200CX* при ускоряющем напряжении 160 кВ.

Изменения ближнего атомного порядка в  $\text{Fe-Ni}$  сплавах сопровождаются увеличением дисперсии  $H$ , а также изменением  $T_C$  и температурным сдвигом кривых намагниченности на несколько градусов. К случаю разупорядочения областей ближнего порядка, по-видимому, можно отнести рост  $\langle H \rangle$  и  $C(\text{Ni})$  в  $\text{Fe-Ni-Al(Ti)}$  сплавах при малых величинах деформации. Активное деформационное растворение интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы зависит от природы интерметаллидов и может осуществляться при больших критических деформациях, например при  $\epsilon \geq 4$ .

Обращает на себя внимание рост наклона кривых  $\Delta C(\text{Ni})$  в зависимости от  $\epsilon$  при снижении температуры деформации. Наблюдаемое изменение можно объяснить ослаблением релаксационной составляющей по пути динамического старения сплава при снижении температуры. Этот вывод был сделан также в работах [1–6]. Смена направления процесса «растворения – выделения» после деформации при повышенных

температурах и рост наклона кинетической зависимости при 573 К также согласуются с представлениями о конкуренции динамического старения с растворением интерметаллидов в процессе деформации.

Из полученных результатов видно, что релаксационные диффузионные процессы при СД могут частично компенсировать неравновесное растворение интерметаллидов уже при температуре ниже комнатной, а с увеличением температуры диссипация механической энергии в сплаве проходит преимущественно по пути старения. Таким образом, наблюдаемые изменения в поведении кинетических кривых (зависимостей  $\Delta C(\text{Ni}) = C(\text{Ni}) - C(\text{Ni})_0$ ) от температуры и скорости деформации) обусловлены старением.

Увеличение скорости деформации от  $0,024$  до  $0,08 \text{ с}^{-1}$  в условиях сдвига под давлением, во-первых, приводит к смещению баланса неравновесного растворения и динамического старения в сторону растворения, что объясняется снижением времени действия динамического старения. Во-вторых, усиливает зависимость динамического старения от температуры, что предположительно объясняется ростом напряжений в структуре и дополнительной диспергизацией  $\gamma'$ -фазы.

На основе полученных данных предложено соотношение, дающее феноменологическое описание кинетики деформационно-индуцированных фазовых переходов в ГЦК Fe–36Ni–9Al сплаве, которое учитывает конкуренцию неравновесной составляющей растворения и альтернативной релаксационной составляющей динамического старения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-13-00908).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий / Д. С. Герцрикен [и др.] // Киев: РИО ИМФ, 1999. 436 с.
2. Глезер А. М., Поздняков В. А. Механизмы релаксации и различные пути эволюции дефектной структуры при больших пластических деформациях // ДАН. 2004. Т. 398. № 6. С. 756–758.
3. Сагарадзе В. В., Шабашов В. А. Аномальные диффузионные фазовые превращения в сталях при интенсивной холодной деформации // ФММ. 2011. Т. 112. № 2. С. 155–176.
4. Штремель М. А. Об участии диффузии в процессах механического легирования // МиТОМ. 2002. № 8. С. 10–12.
5. Скаков Ю. А. Высокоэнергетическая холодная пластическая деформация, диффузия и механохимический синтез // МиТОМ. 2004. № 4. С. 3–12.
6. Mechanomaking of nanostructure in nitrided Fe-Cr alloys by cyclic “dissolution-precipitation” deformation-induced transformations / V. A. Shabashov [et al.] // High Pressure Research. 2013. V. 33. № 4. P. 795–812.